

ANALISIS PENGARUH SISTEM PENAHAN BEBAN LATERAL TERHADAP KINERJA STRUKTUR RANGKA BAJA GEDUNG BERATURAN

I Ketut Sudarsana¹, Ida Bagus Dharma Giri¹, Putu Didik Sulistiana²

¹Dosen Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Udayana, Denpasar

²Alumni Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Udayana, Denpasar

E-mail: ksudarsana@civil.unud.ac.id

Abstrak

Kinerja suatu struktur terhadap beban gempa tergantung dari system struktur penahan beban lateral yang dipergunakan. Penelitian ini dilakukan untuk membandingkan kinerja sistem struktur penahan beban lateral pada struktur rangka baja gedung beraturan tingkat rendah dan sedang. Analisis dilakukan terhadap gedung beraturan dengan empat (4) dan sepuluh (10) tingkat. Masing-masing tingkat ditinjau 3 buah model struktur dengan variasi system struktur pemikul beban lateral yaitu Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK), Sistem Rangka Bresing Eksentris (SRBE), dan Sistem Rangka-Dinding Geser (*shear wall*). Semua Model dibebani dan dirancang mengacu pada Standar Nasional Indonesia SNI 2847:2013, SNI 1729:2002 dan SNI 1726:2012. Analisis kinerja struktur dilakukan dengan Analisis static nonlinear pushover. Struktur akan dianalisa menggunakan beban gravitasi, hujan, angin serta beban gempa yang mengacu pada ketentuan SNI 03-1726-2012 (Gempa). Dari hasil analisis dan pembahasan dapat diambil kesimpulan, bahwa perbandingan kinerja dengan sistem penahan beban lateral pada struktur rangka baja gedung beraturan adalah sistem dinding geser memiliki gaya geser dasar batas yang paling besar dari model lain. Dengan nilai gaya geser dasar untuk model 4 LT sistem dinding geser 11647,63 KN; SRBE 8402,88 KN; SRPMK 4576,70 KN dan untuk model 10 LT sistem dinding geser 16793,63 KN; SRBE 11122,53 KN; SRPMK 5157,38 KN. Sistem dinding geser memiliki kinerja perpindahan yang paling baik, karena nilai perpindahan dari sistem dinding geser paling kecil dari model lain. Dengan nilai perpindahan untuk model 4 LT sistem dinding geser 3,46 mm; SRBE 6,47 mm; dan SRPMK 19,11 mm. Model 10 LT sistem dinding geser 25,54 mm; SRBE 44,64 mm; dan SRPMK 89,49 mm. Untuk beban gempa yang sama mengacu pada model SRPMK. Dengan nilai perpindahan untuk model 4 LT SRPMK 458,90 mm; SRBE 91,17 mm; sistem dinding geser 28,76 mm dan untuk model 10 LT SRPMK 851,42 mm; SRBE 235,54 mm; sistem dinding geser 187,56 mm. SRPMK memiliki nilai daktilitas lebih besar dari model lain. Dimana nilai daktilitas untuk model 4 LT SRPMK 4,65; SRBE 3,06; sistem dinding geser 2,67 dan untuk model 10 LT SRPMK 4,77; SRBE 3,25; sistem dinding geser 2,84.

Kata kunci : kinerja, analisis pushover, struktur baja, SRPMK, SRBE, dinding geser.

ANALYSIS EFFECT LATERAL LOAD RESISTING SYSTEM TOWARDS PERFORMANCE STEEL FRAME REGULAR BUILDING

Abstract: Performance of a structure against earthquake loads depends on the structural system used in the building. This research was done to compare the performances of lateral load resisting system used in low to medium rise steel frame regular building. The analysis was done for four and ten storey regular building. For each storey, there are three models to be investigated with variation on structural system namely Special Moment Frame (SMF), Excentric Brace Frame (EBF) and Dual System (Shear Wall). All models have equal gravity loads and are designed conforming to the Indonesia standard namely SNI 2847-2013, SNI 03-1729-2002, SNI 1726 (2012). Structural performance analysis were done using static non-linear pushover analysis. The analysis result shows that shear wall system has the highest base shear. The base shear of the four storey building is respectively 1164.63 kN; 8402.88 kN; 4576.70 kN for shear wal, EBF and SMF system. For building model of 10-floors, the base shear is 16793.63 kN; 11122.53 kN; dan 5157.38 kN respectively for shear wall, EBF and SMF system. The shear wall systems show the best performance was indicated by the smallest displacement value. The lateral displacement of the 4 storey building are 3.46mm, 6.47 mm and 19.11 mm respectively for shear wall, EBF and SMF system. For 10 storey building the lateral displacement are 851.42 mm, 235.54 mm, 187.56 mm for shear wall, EBF and SMF respectively. Duckyility of SMF system is the highest between 4 and 10 storey building. The ductility of the SMF system is 4.65 and 4.77 for 4 and 10 storey building respectively. For the EBF and shear wall system, the ductility is 3.06 and 3.25; 2.67 and 2.84, respectively for four and ten storey building.

Keywords: performance, pushover analysis, steel frame, SMF, EBF, shear wall

PENDAHULUAN

Dalam disain struktur tahan gempa, perilaku in-elastis dari struktur sangat diharapkan untuk terjadinya pemencaran energi gempa baik pada saat gempa sedang maupun gempa kuat (Mustopo, 2010). Untuk memperoleh perilaku optimal dari struktur tersebut maka dibutuhkan perhatian khusus atau pendetailan yang baik pada elemen-elemen strukturnya.

struktur gedung pada wilayah dengan resiko gempa tinggi (KDS D, E, F) memerlukan sistem penahan beban lateral. Dalam SNI 1726:2012, ada 8 kelompok sistem struktur penahan beban gempa diantaranya adalah Sistem Rangka Pemikul Momen (SRPM), Sistem Rangka Bresing (SRB) dan Sistem Rangka Dinding Geser (SRDG). Perilaku sistem-sistem struktur tersebut tentu berbeda dalam merespon beban gempa yang terjadi, sehingga kinerja dari sistem struktur tersebut perlu pelajari lebih jauh untuk dapat dijadikan acuan dalam pemilihan sistem struktur dalam mendisain.

Dalam penelitian ini dilakukan analisis kinerja struktur dengan sistem penahan beban lateral yang mengacu pada ketentuan SNI 03-1726-2012, struktur tersebut akan dibandingkan kinerjanya akibat beban gempa dengan bantuan program SAP2000 v15.

Manfaat Penelitian

Memahami Kinerja dari Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK), Sistem Rangka Bresing (SRBE) dan Sistem Rangka Dinding Geser (Dual System) pada struktur baja adalah sangat penting terutama dalam mendisain struktur baja pada wilayah dengan resiko gempa tinggi.

METODE

Gambaran Struktur yang Ditinjau

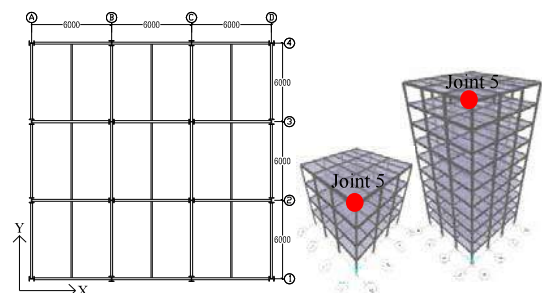
Tiga buah sistem struktur baja dengan denah beraturan ditinjau dalam studi ini yaitu SRPMK, SRBE dan SRDG (dual sistem). Struktur memiliki 3(tiga) bentang dalam arah Sumbu X dan Y dengan panjang 6 m. Masing-masing sistem struktur ditinjau 2(dua) buah struktur yaitu struktur gedung 4 dan 10 tingkat. Adapun tinggi tingkat dari kedua struktur tersebut adalah sama

yaitu 3.5m. Struktur dengan 4 tingkat diharapkan mewakili struktur tingkat rendah dimana kekuatan menjadi kontrol dalam disain, sedangkan struktur 10 tingkat mewakili struktur tingkat menengah dan tinggi dimana kekakuan menjadi kontrol dalam disain disamping adanya kontribusi mode-mode getaran yang lebih tinggi dalam responsnya. Gambar 1,2 dan 3 menunjukkan denah dan portal dari sistem struktur yang ditinjau serta identifikasi dari join pada atap yang dimonitor simpangannya.

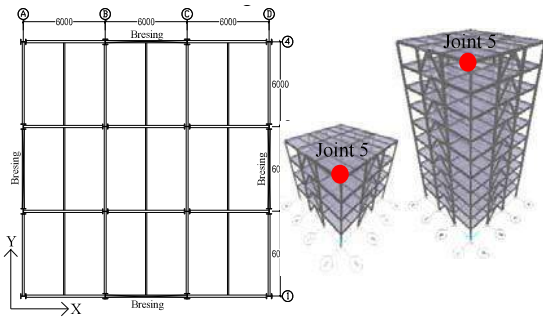
Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) merupakan system struktur yang paling banyak dipergunakan terutama pada struktur-struktur gedung bertingkat rendah meskipun menurut SNI 1726:2012 sistem ini dapat dipergunakan untuk semua KDS tanpa batas ketinggian. SRPMK memiliki daktilitas yang tinggi dan dapat berdeformasi in-elastik pada saat gempa terjadi (AISC, 2005).

Struktur SRBE bresing *K-Split* dengan panjang *link beam* 0,3 meter ditinjau dalam analisis ini. Panjang *link beam* ini dipilih karena menghasilkan persentase terbesar pada parameter kekuatan dan daktilitas (Mustopo, 2010; Astarika, 2013). Untuk menghasilkan struktur yang tetap berperilaku sebagai struktur beraturan penempatan bresing pada keempat tepi bangunan pada bentang tengah.

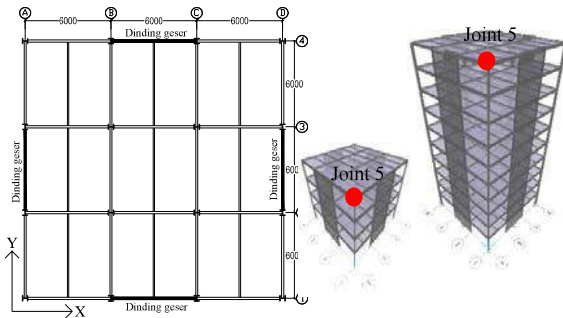
Sistem struktur rangka baja dengan dinding struktur beton bertulang (SRDS) dapat memberikan kekakuan struktur yang lebih besar sehingga deformasi horizontal menjadi kecil. Seperti halnya pada SRBE, dinding struktur ditempatkan pada lokasi yang sama dengan bresing seperti terlihat pada Gambar 3. Sistem struktur seperti ini juga dikenal sebagai sistem struktur hibrid.



Gambar 1. Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus



Gambar 2. Sistem Rangka Bresing Eksentris



Gambar 3. Sistem struktur rangka dinding geser

Data Material Struktur dan Pembebanan

Mutu baja dan beton yang dipakai dalam analisis ini adalah masing-masing BJ 41 (fy 240 MPa) dan f'c 25MPa. Beban gravitasi yang bekerja berupa berat sendiri struktur (D), beban mati tambahan (D+) 104 kg/m², beban mati tambahan pelat atap (Da+) 80 kg/m², berat pelat lantai (Wlantai) 642 kg/m², dan berat pelat atap (Watap) 440 kg/m². Beban air hujan (R) 20 kg/m², beban angin yaitu dipihak angin 216 kg/m dan dibelakang angin 96 kg/m. Beban gempa berlokasi di Bali dengan Ss= 1,025 dan S1 =1,025, jenis tanah lunak (SE) dengan Fa = 0,9 dan Fv = 2,4. Untuk kombinasi beban pada model berdasarkan SNI 1726:2012 yaitu:

- a. 1,4 D (1)
- b. 1,2 D + 1,6 L + 0,5 (L_r atau R) (2)
- c. 1,2 D + 1,6 L (L_r atau R) + (L atau 0,5W) (3)
- d. 1,2 D + 1,0 W + L + 0,5 (L_r atau R) (4)
- e. 1,2 D + 1,0 E + L (5)
- f. 0,9 D + 1,0 E (6)

Kombinasi beban gempa

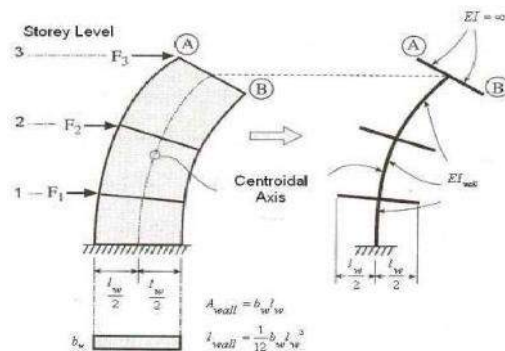
- g. (1,2 + 0,2 S_{DS}) D + ρQ_E + L (7)
- h. (0,9 - 0,2 S_{DS}) D + ρQ_E + 1,6H (8)
- i. (1,2 + 0,2 S_{DS}) D + Ω₀Q_E + L (9)
- j. (0,9 - 0,2 S_{DS}) D + Ω₀Q_E + 1,6H (10)

Pemodelan dan Analisis Struktur

Pemodelan dan disain struktur dilakukan dengan bantuan program SAP2000 ver.15. Elemen-elemen struktur dimodelkan sesuai dengan perilakunya dalam memikul beban. Elemen struktur balok, kolom, bresing dan link dimodelkan sebagai elemen garis sedangkan dinding geser dimodelkan sebagai analogi balok-kolom.

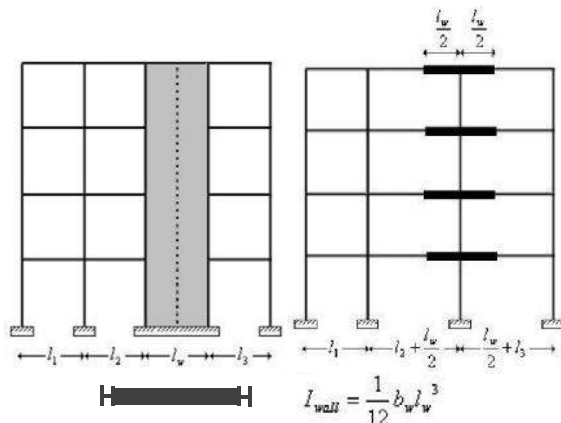
Balok dan kolom dianggap mencapai leleh/sendi plastis masing-masing akibat momen terhadap sumbu lokal 3 (sendi plastis M3) pada balok dan interaksi antara gaya aksial dan momen terhadap sumbu lokal 3 dan 2 (sendi plastis PMM). Elemen bresing merupakan elemen pemikul gaya aksial sehingga leleh terjadi akibat perilaku tekuk tekan atau fraktur akibat tarik sehingga diberikan tipe sendi plastis *default-P* pada lokasi di tengah panjang bresing (0.5l). Sedangkan elemen *Link* diharapkan terjadi kegagalan akibat momen lentur seperti halnya pada elemen balok sehingga tipe sendi plastis *default-M3* dikerjakan pada ujung-ujung *link* tersebut.

Dinding Geser merupakan elemen struktur bidang dan dapat dimodelkan dengan beberapa cara yaitu sebagai *shell element*, rangka batang, portal ekuivalen dan *multi spring* (Tolga, 2004 dan Untari, 2005). Dalam penelitian ini dinding geser dimodelkan sebagai portal ekuivalen mengacu pada ATC 40 dan Atimtay (2001) untuk menyesuaikan dengan analisis yang dipergunakan. Hubungan balok dan kolom diluar dinding digunakan *rigid zone factor* 0.5 sedangkan untuk balok pada daerah kaku dinding geser, digunakan *rigid zone factor* sebesar 1 (Tolga, 2004 dan Untari, 2005). Kekakuan lentur dari dinding dapat dihitung dengan menggunakan penampang dari dinding (Atimtay, 2001), seperti pada Gambar 5.



Gambar 5. *Equivalent Mathematical Model*
Sumber: Atimtay, 2001

Pada penelitian ini, dinding geser dibatasi dengan balok baja IWF yang sekaligus berfungsi sebagai elemen batas, oleh karena itu kolom ekuivalen dimodel sebagai kolom bentuk I dengan dimensi yang didapat dari mengkombinasikan dimensi kolom dan dinding geser seperti terlihat pada Gambar 6. Untuk mengkombinasikan elemen kolom ekuivalen digunakan fasilitas *section designer* pada menu *frame sections* dalam SAP 2000 v.15.

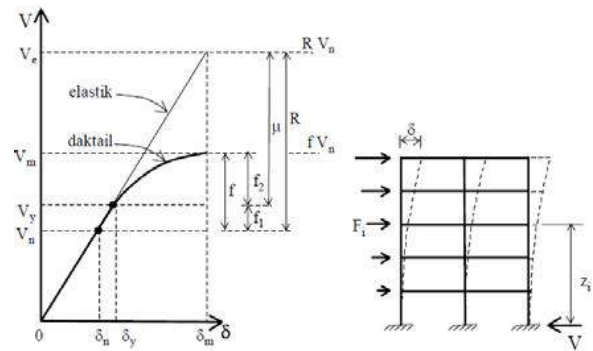


Gambar 6. *Mathematical Model of a Frame-Wall Structure*
Sumber: Atmtay, 2001

Metode portal ekuivalen ini merupakan pendekatan untuk analisis elastis dinding kantilever, metode yang akan memenuhi persyaratan keseimbangan statis mengarah ke distribusi yang memuaskan dari tindakan internal di antara dinding struktur in-elastis (Paulay, 1981). Model portal ekuivalen ini sesuai untuk memodel dinding geser dengan $H/B > 51$ (Tolga, 2004 dan Untari, 2005).

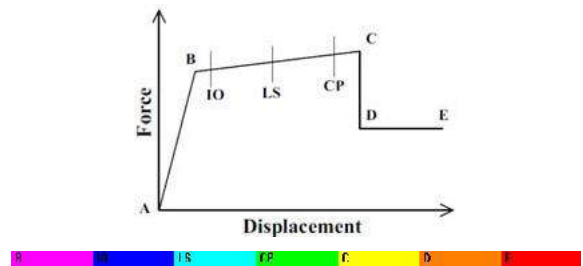
Analisis Statik Nonlinier Pushover

Analisis *pushover* merupakan analisis statik nonlinear dimana beban-beban bekerja pada struktur secara statis dan ditingkatkan secara terus menerus sampai elemen-elemen struktur mengalami leleh dan akhirnya mengalami keruntuhan. Setelah salah satu lokasi dari struktur mengalami leleh maka akan terjadi perubahan kekakuan struktur tersebut begitu juga halnya dengan respon struktur mengalami kondisi nonlinear. Analisis beban dorong statik (*pushover*) akan menghasilkan kurva hubungan antara perpindahan (*displacement*) titik kontrol () dan gaya geser dasar (V). Seperti terlihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Kurva hubungan beban – perpindahan
Sumber: SNI 1726-2012

Dari kurva *pushover* dapat ditentukan parameter daktilitas (μ), kekakuan, dan kekuatan. Parameter-parameter tersebut mencerminkan perilaku struktur akibat beban lateral (gempa) pada struktur.



Gambar 8. Kurva hubungan gaya – perpindahan serta karakteristik sendi plastis dan informasi level kinerja bangunan
Sumber: FEMA 273

Gambar 8 menunjukkan hubungan gaya perpindahan yang mengikuti kurva dari titik A sampai E. Titik tersebut merepresentasikan kondisi sendi plastis yang timbul pada elemen struktur, dimana A: *Origin Point* (titik awal), B: *Yield Point* (titik leleh), IO: *Immediate Occupancy* (segera dapat ditempati), LS: *Life Safety* (keamanan terhadap jiwa penghuninya), CP: *Collapse Prevention* (pencegahan keruntuhan), C: *Ultimate Point* (titik batas), D: *Residual Point* (titik sisa), dan E: *Failure Point* (titik keruntuhan).

Dimensi Struktur

Berdasarkan beban-beban yang bekerja pada semua struktur, maka dilakukan analisis linear dan dilanjutkan dengan pengecekan dimensi strukturnya. Hasil analisis dan disain elemen struktur yang memenuhi persyaratan SNI 1726-2012 dan SNI 2847:2013 dapat dilihat pada Tabel 1. Semua sistem struktur yang ditinjau (SRPMK,

SRBE dan SRDS) pada tingkat gedung yang sama (misal gedung 4 tingkat) memiliki dimensi yang sama. Hal ini untuk memfokuskan pembahasan pada pengaruh keberadaan bresing dan dinding geser, sehingga intervensi dari perbedaan dimensi balok dan kolom dapat dihilangkan.

Tabel 1. Dimensi struktur

Elemen	Dimensi			
	4 Lantai		10 Lantai	
Kolom Tengah	HB	350 x 350 x 12 x 19	HB	400 x 400 x 13 x 21
Kolom Pinggir	HB	250 x 250 x 9 x 14	HB	350 x 350 x 12 x 19
Balok Induk	IWF	450 x 200 x 9 x 14	IWF	450 x 200 x 9 x 14
Balok Anak	IWF	300 x 150 x 6,5 x 9	IWF	300 x 150 x 6,5 x 9
Link	IWF	400 x 200 x 8 x 13	IWF	400 x 200 x 8 x 13
Bresing	IWF	450 x 200 x 9 x 14	IWF	450 x 200 x 9 x 14

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Analisis Linear Struktur

Dimensi elemen struktur (balok, kolom dan bresing) yang telah dipilih kemudian dilakukan pengecekan terhadap beban-beban yang bekerja. Hasil disain dimensi baja profil pada SRPMK, SRBE dan SRDS sudah memenuhi persyaratan kekuatan struktur yaitu tidak melebihi nilai stress ratio 0.95. Nilai stress ratio setiap model tersebut ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Stress ratio untuk masing-masing elemen struktur.

Model	Strength Ratio (≤ 0.95)						Keterangan
	Kolom Pinggir	Kolom Tengah	Balok Induk	Balok Anak	Link	Bresing	
SRPMK	(0,0 - 0,7)	(0,0 - 0,9)	(0,0 - 0,9)	(0,0 - 0,5)	-	-	OK
SRBE	(0,0 - 0,5)	(0,0 - 0,5)	(0,0 - 0,5)	(0,0 - 0,5)	0,0 - 0,5	0,0 - 0,5	OK
Sistem Dinding Geser	(0,0 - 0,5)	(0,0 - 0,5)	(0,0 - 0,5)	(0,0 - 0,5)	-	-	OK

Kontrol Simpangan pada Analisis Linear

Menurut SNI 1726:2012, simpangan antar tingkat disain () tidak boleh melebihi simpangan antar tingkat ijin (a). Berdasarkan hasil analisis diperoleh total simpangan arah X dan Y untuk masing-masing model seperti pada Tabel 3 dan 4.

Tabel 3. Simpangan semua sistem struktur untuk gedung 4 LT

a. Akibat beban gempa arah X

Simpangan	SRPMK		SRBE		Sistem Dinding Geser	
	X	Y	X	Y	x	y
Simpangan Nominal (mm)	19.11	1E-09	6.47	2E-11	3.46	4.356E-12
Simpangan Ijin (mm)	160	160	160	160	160	160
Keterangan	OK	OK	OK	OK	OK	OK

b. Akibat beban gempa arah Y

Simpangan	SRPMK		SRBE		Sistem Dinding Geser	
	X	Y	X	Y	x	y
Simpangan Nominal (mm)	1E-09	19.11	2E-11	6.47	4.4E-12	3.46
Simpangan Ijin (mm)	160	160	160	160	160	160
Keterangan	OK	OK	OK	OK	OK	OK

Tabel 4. Simpangan semua sistem struktur untuk gedung 10 LT

a. Akibat beban gempa arah X

Simpangan	SRPMK		SRBE		Sistem Dinding Geser	
	X	Y	X	Y	x	y
Simpangan Nominal (mm)	89.49	-0.03	44.64	-0.02	25.54	-0.01
Simpangan Ijin (mm)	160	160	160	160	160	160
Keterangan	OK	OK	OK	OK	OK	OK

b. Akibat beban gempa arah Y

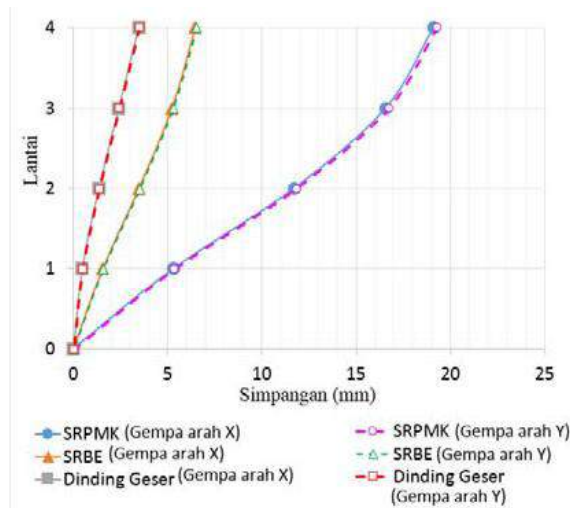
Simpangan	SRPMK		SRBE		Sistem Dinding Geser	
	X	Y	X	Y	x	y
Simpangan Nominal (mm)	-0.026	89.49	-0.018	44.64	-0.01	25.54
Simpangan Ijin (mm)	160	160	160	160	160	160
Keterangan	OK	OK	OK	OK	OK	OK

Dari Tabel 3 dan 4 nilai simpangan maksimum pada struktur 4 tingkat sebesar 19,11 mm dan struktur 10 tingkat sebesar 89,49 mm (SRPMK) akibat beban gempa. Simpangan maksimum ini masih lebih kecil dari persyaratan sehingga struktur memiliki kekakuan yang cukup dan memenuhi kelayakan sesuai standar SNI 1726-2012.

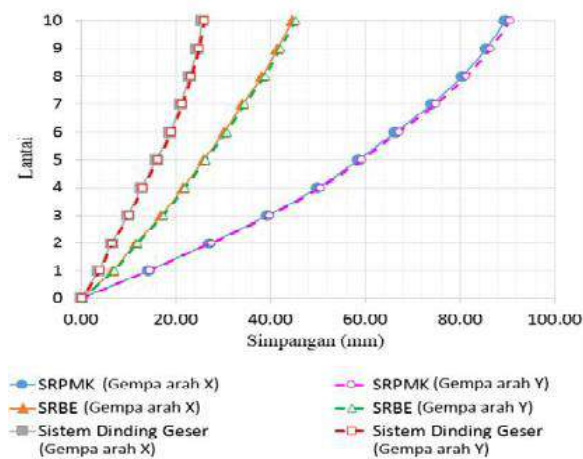
Simpangan tingkat pada masing-masing sistem struktur yang ditinjau ditampilkan pada Tabel 5. Yang kemudian diplot pada Gambar 9 dan 10. Disini jelas terlihat bahwa SRDS menghasilkan simpangan terkecil baik arah sumbu X maupun arah sumbu Y pada kedua gedung yang ditinjau, kemudian diikuti oleh SRBE dan SRPMK.

Tabel 5. Simpangan antar lantai masing-masing model arah X dan Y akibat gaya gempa.

Lantai	Simpangan (mm)											
	SRPMK			SRBE			Sistem Dinding Geser					
	4LT	4LT	10LT	10LT	4LT	4LT	10LT	10LT	4LT	4LT	10LT	10LT
10	-	-	89.49	89.52	-	-	44.64	44.68	-	-	25.54	25.55
9	-	-	85.42	85.45	-	-	41.44	41.45	-	-	24.46	24.48
8	-	-	80.33	80.34	-	-	38.20	38.53	-	-	22.86	22.87
7	-	-	73.95	73.98	-	-	34.05	34.08	-	-	20.95	20.98
6	-	-	66.25	66.29	-	-	30.21	30.24	-	-	18.76	18.80
5	-	-	58.45	58.48	-	-	25.86	25.88	-	-	15.84	15.89
4	19.11	19.12	49.93	49.95	6.47	6.50	21.57	21.60	3.46	3.47	12.74	12.76
3	16.57	16.59	39.29	39.33	5.23	5.28	16.94	16.97	2.41	2.44	9.85	9.89
2	11.70	11.72	27.09	27.24	3.47	3.52	11.60	11.64	1.35	1.38	6.42	6.46
1	5.30	5.32	14.15	14.16	1.55	1.59	6.75	6.77	0.47	0.50	3.74	3.75



Gambar 9. Simpangan struktur 4 LT



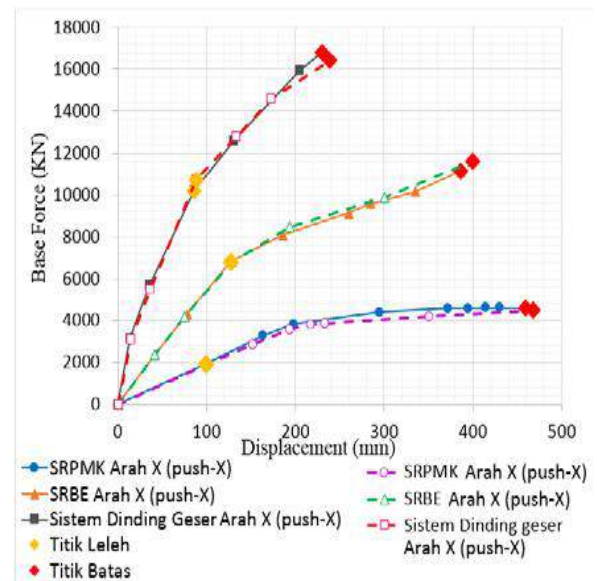
Gambar 10. Simpangan struktur 10 LT

Hasil Analisis Pushover

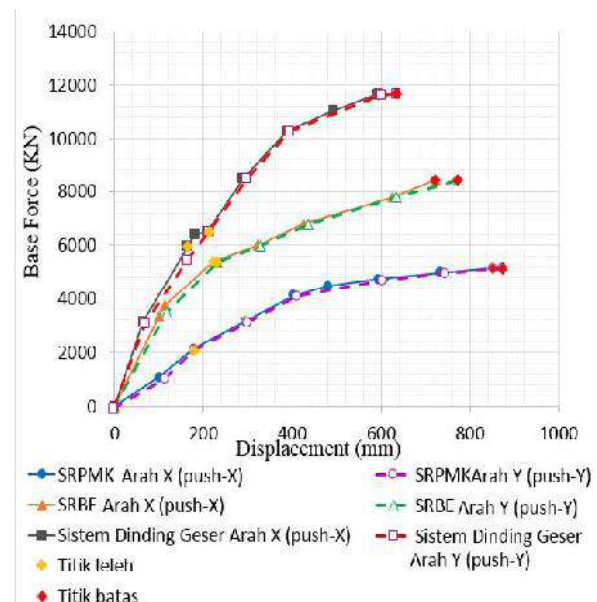
Hasil analisis *pushover* dapat berupa kurva *pushover*, yang menggambarkan perilaku struktur akibat beban gravitasi dan beban gempa static yang ditingkatkan secara terus-menerus sampai mengalami pola keruntuhan (*collapse*). Kondisi struktur mencapai collapse diidentifikasi oleh terbentuknya sendi plastis collapse pada salah satu lokasi struktur. Analisis ini juga menggambarkan mekanisme dan pola keruntuhan yang terjadi selama proses peningkatan beban.

Kurva Pushover

Kurva *pushover* menunjukkan hubungan antara perpindahan pada titik atap yang ditinjau dan gaya geser dasar untuk masing-masing arah gempa yang sama. Gambar 11 dan 12 menunjukkan kurva *pushover* pada titik perpindahan yang ditinjau pada joint 5 seperti Gambar 1, 2 dan 3.



Gambar 11. Perbandingan kurva pushover Struktur 4LT



Gambar 12. Perbandingan kurva pushover struktur 10LT

Gambar 11 dan 12 menunjukkan bahwa model sistem dinding geser memiliki *strength* atau kekuatan yang lebih besar dalam menahan beban gempa dibandingkan dengan model lain. Tabel 7 dan 8 menunjukkan gaya geser dasar dan perpindahan pada atap masing-masing model pada kondisi leleh dan kondisi batas baik untuk Arah X maupun Arah Y.

Tabel 7. Gaya geser dasar masing-masing model arah X dan Y hasil analisis pushover

a. Struktur 4 LT

Gaya geser dasar	SRPMK		SRBE		Sistem Dinding Geser	
	X	Y	X	Y	X	Y
Pada kondisi leleh (KN)	1904.51	1960.95	5391.73	5396.47	6514.76	6525.77
Presentase (%)	100	100	283.10	275.20	342.07	332.79
Pada kondisi batas (KN)	4576.70	4592.69	8402.88	8414.65	11647.63	11658.34
Presentase (%)	100	100	183.60	183.22	254.50	254.07

b. Struktur 10 LT

Gaya geser dasar	SRPMK		SRBE		Sistem Dinding Geser	
	X	Y	X	Y	X	Y
Pada kondisi leleh (KN)	3143.5	3151.2	6802.69	7010.19	10196.71	11030.91
Presentase (%)	100	100	216.40	222.46	324.37	350.05
Pada kondisi batas (KN)	5157.38	5164.23	11122.53	11923.37	16793.63	16878.93
Presentase (%)	100	100	215.66	230.88	325.62	326.84

Tabel 8. Perpindahan atap masing-masing model arah X dan Y hasil analisis pushover

a. Struktur 4 LT

Simpangan	SRPMK		SRBE		Sistem Dinding Geser	
	X	Y	X	Y	X	Y
Pada kondisi leleh (mm)	98.65	98.77	126.4	127.01	86.21	87.15
Presentase (%)	100	100	128.13	128.59	87.39	88.24
Pada kondisi batas (mm)	458.90	465.16	386.60	396.87	230.18	237.29
Presentase (%)	100	100	84.24	85.32	50.16	51.01

b. Struktur 10 LT

Simpangan	SRPMK		SRBE		Sistem Dinding Geser	
	X	Y	X	Y	X	Y
Pada kondisi leleh (mm)	178.4	180.33	222.05	231.34	208.94	213.45
Presentase (%)	100	100	124.47	128.29	117.12	118.37
Pada kondisi batas (mm)	851.42	867.54	722.56	768.53	593.41	631.35
Presentase (%)	100	100	84.87	88.59	69.70	72.77

Tabel 9 menunjukkan perpindahan arah X dan Y masing-masing model struktur pada kondisi beban gempa yang sama yaitu beban gempa maksimum SRPMK. Simpangan pada SRBE dan SRDS masing-masing sekitar 20% dan 7% simpangan SRPMK untuk struktur 4 tingkat. Sedangkan untuk struktur 10 tingkat, simpangan SRBE dan SRDS masing-masing sekitar 28% dan 22% simpangan SRPMK.

Tabel 9. Perpindahan pada kondisi beban gempa yang sama pada model SRPMK pada kondisi batas

a. Struktur 4 LT

Simpangan	SRPMK		SRBE		Sistem Dinding Geser	
	X	Y	X	Y	X	Y
Displacement (mm)	458.90	465.16	91.17	94.61	30.76	32.84
Presentase (%)	100	100	19.87	20.34	6.70	7.06

b. Struktur 10 LT

Simpangan	SRPMK		SRBE		Sistem Dinding Geser	
	X	Y	X	Y	X	Y
Displacement (mm)	851.42	867.54	235.54	245.56	187.56	193.64
Presentase (%)	100	100	27.66	28.31	22.03	22.32

Performance Point, redaman dan periode arah X dan Y dari masing-masing model dihitung mengacu pada ketentuan pada FEMA 356 dan ATC 40 dapat dilihat pada Tabel 10. *Performance point* ditentukan berdasarkan target perpindahan yang dicapai (δ_t). Sesuai dengan nilai target perpindahan tersebut, maka semua model termasuk mencapai *life safety*.

Pada saat tercapainya *performance point*, struktur memiliki periode dan redaman efektifnya seperti ditampilkan pada Tabel 11 dan 12.

Tabel 10. Nilai *Performance Point*

Metode	SRPMK		SRBE		Sistem Dinding Geser		
	4 LT	10 LT	4 LT	10 LT	4 LT	10 LT	
FEMA 356	δ_y (mm)	504.74	524.13	86.84	91.21	51.42	51.57
	V_t (KN)	4401.41	4423.14	5501.11	5773.87	7473.77	7498.27
ATC-40	δ_y (mm)	504.01	523.81	86.14	91.02	51.28	51.30
	V_t (KN)	4389.95	4405.67	5415.51	5731.47	7457.82	7469.46

Tabel 11. Redaman dan Periode Masing-Masing Struktur

a. Model 4 LT

Performance	SRPMK		SRBE		Sistem Dinding Geser	
	X	Y	X	Y	X	Y
Telf	1.21	1.21	0.58	0.58	0.45	0.45
Beff	0.14	0.14	0.10	0.10	0.05	0.05

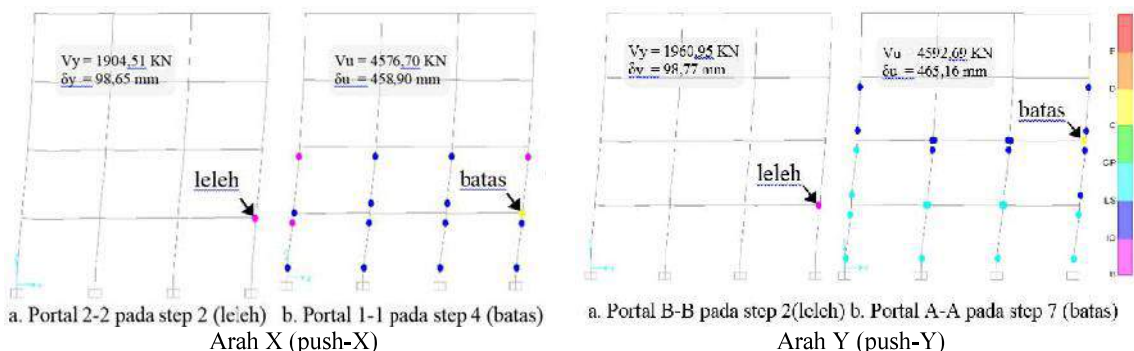
b. Model 10 LT

Performance	SRPMK		SRBE		Sistem Dinding Geser	
	X	Y	X	Y	X	Y
Telf	1.56	1.56	0.89	0.89	0.63	0.63
Beff	0.18	0.18	0.14	0.14	0.07	0.07

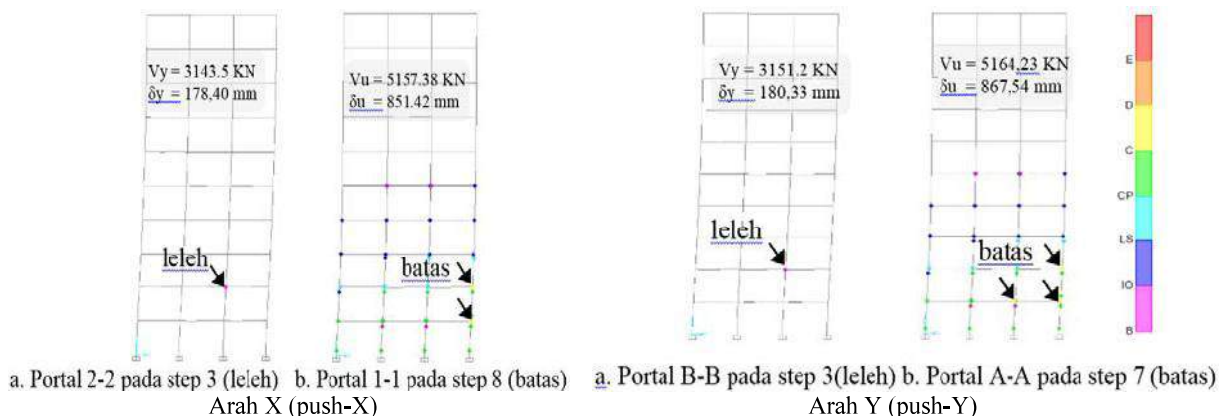
Mekanisme Terbentuknya Sendi Plastis

Sendi plastis yang terbentuk pada semua sistem struktur yang ditinjau ditampilkan dari Gambar 13 sampai dengan 18. Gaya geser dasar dan simpangan pada titik yang ditinjau (titik 5) baik pada kondisi leleh maupun ultimit ditampilkan bersama-sama pada gambar. Portal yang ditampilkan hanya yang bersesuaian dengan kondisi sendi plastis yang terjadi (kondisi leleh atau ultimit).

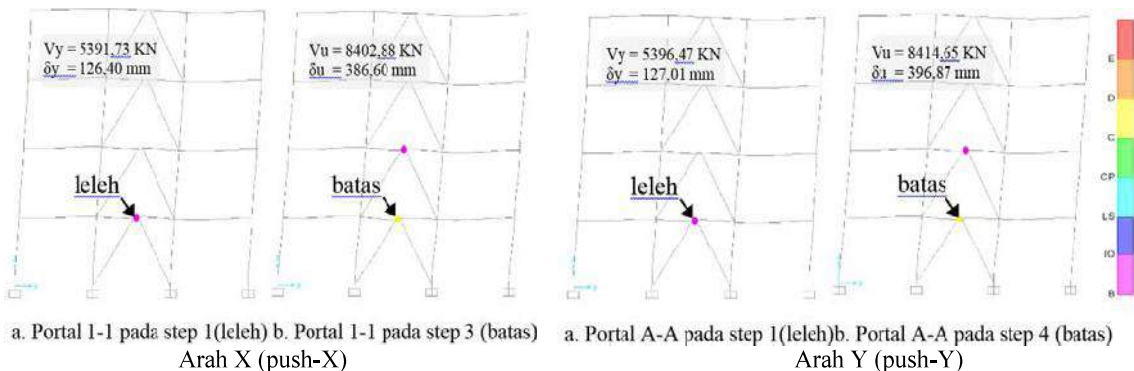
Berdasarkan Gambar 13 dan 14, sendi plastis dalam kondisi batas pada SRPMK tercapai pada ujung balok baik untuk model gedung 4LT maupun 10 LT. Pada struktur SRBE sendi plastis kondisi batasnya terjadi pada link sedangkan pada SRDS terjadi pada ujung bawah kolom ekuivalen dinding gesernya. Perilaku ini sesuai dengan yang diharapkan terjadi pada system-sistem struktur tersebut. Namun sendi plastis yang terbentuk belum sepenuhnya pada elemen struktur sebelum mengalami keruntuhan.



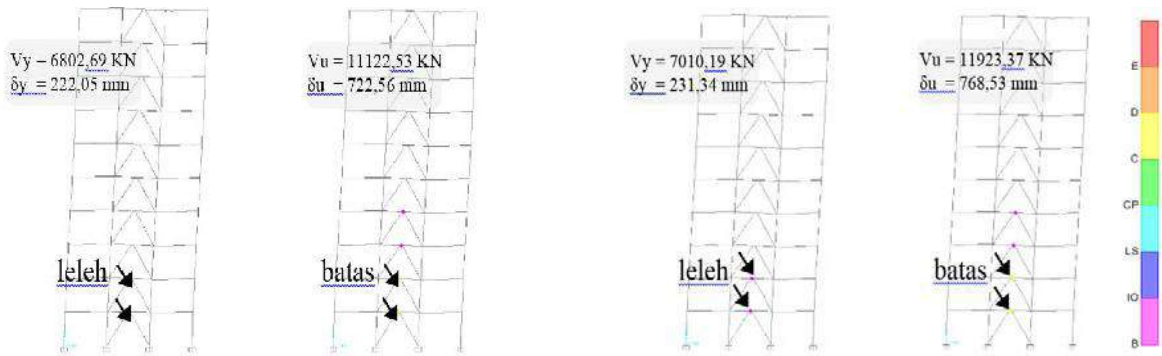
Gambar 13. Perilaku keruntuhan struktur SRPMK gedung 4 LT



Gambar 14. Perilaku keruntuhan struktur SRPMK gedung 10 LT

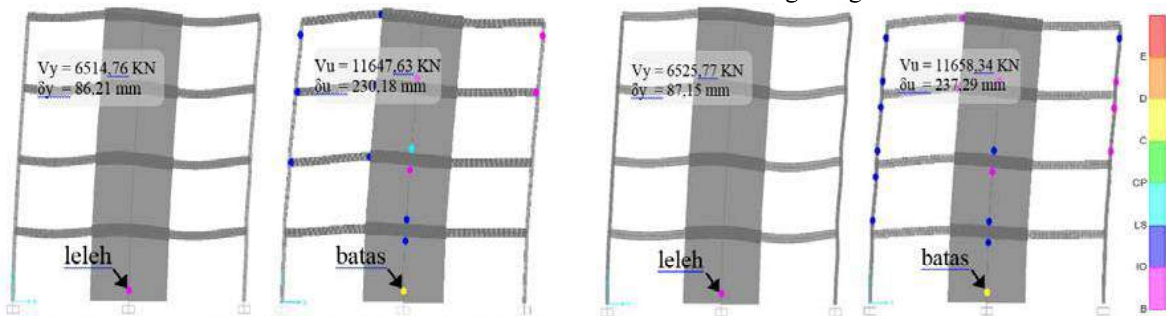


Gambar 15. Perilaku keruntuhan struktur SRBE untuk gedung 4LT



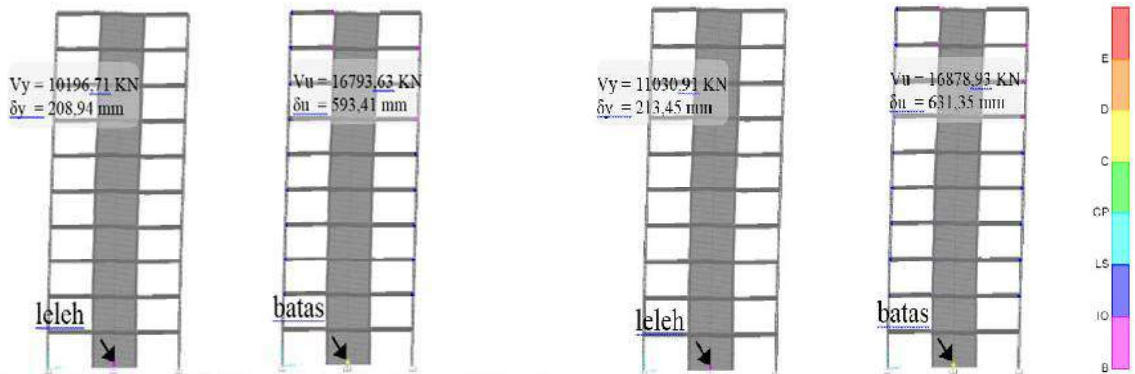
a. Portal 1-1 pada step 2(leleh) b. Portal 1-1 pada step 6 (batas) a. Portal A-A pada step 1(leleh) b. Portal A-A pada step 4 (batas)
Arah X (push-X) Arah Y (push-Y)

Gambar 16. Perilaku keruntuhan struktur SRBE untuk gedung 10 LT



a. Portal 1-1 pada step 2(leleh) b. Portal 1-1 pada step 5 (batas) a. Portal A-A pada step 2 (leleh) b. Portal A-A pada step 6 (batas)
Arah X (push-X) Arah Y (push-Y)

Gambar 17. Perilaku keruntuhan struktur SRDS untuk Gedung 4LT



a. Portal 1-1 pada step 4(leleh) b. Portal 1-1 pada step 10 (batas) a. Portal A-A pada step 3 (leleh) b. Portal A-A pada step 8 (batas)
Arah X (push-X) Arah Y (push-Y)

Gambar 18. Perilaku keruntuhan struktur SRDS untuk gedung 10LT

Jumlah Sendi Plastis

Jumlah sendi plastis pada saat kondisi leleh dan kondisi batas pada model SRPMK, SRBE, dan SRDS terlihat pada Tabel 12 dan 13 untuk gedung 4 tingkat dan 10 tingkat. Dari keseluruhan sendi plastis yang didefinisikan, tidak semuanya terbentuk sebelum struktur mengalami keruntuhan.

Tabel 12. Jumlah sendi plastis struktur 4 LT

Model	Sumbu	Kondisi	Step	Bto	IO	LS	LS	CP	CP	C	C	D	D	E	Beyond
SRPMK	X	Titik leleh	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Titik batas	9	4	50	8	4	2	0	0	0	0	0	0	0
	Y	Titik leleh	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Titik batas	7	2	36	38	4	6	0	0	0	0	0	0	0
SRBE	X	Titik leleh	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
		Titik batas	8	12	14	2	4	2	0	0	0	0	0	0	
	Y	Titik leleh	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
		Titik batas	6	10	14	0	2	2	0	0	0	0	0	0	
Sistem Dinding Geser	X	Titik leleh	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
		Titik batas	6	6	4	4	2	2	0	0	0	0	0	0	
	Y	Titik leleh	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
		Titik batas	6	2	6	2	2	2	0	0	0	0	0	0	

Tabel 13. Jumlah sendi plastis struktur 10 LT

Model	Sumbu	Kondisi	Step	BtoIO	IOtoLS	LSLStoCP	CPtoC	CtoD	DtoE	BeyondE
SRPMK	X	Titik leleh	1	2	0	0	0	0	0	0
		Titik batas	9	4	50	8	4	2	0	0
	Y	Titik leleh	1	2	0	0	0	0	0	0
		Titik batas	7	2	36	38	4	6	0	0
SRBE	X	Titik leleh	3	2	0	0	0	0	0	0
		Titik batas	8	12	14	2	4	2	0	0
	Y	Titik leleh	3	2	0	0	0	0	0	0
		Titik batas	6	10	14	0	2	2	0	0
Sistem Dinding Geser	X	Titik leleh	3	2	0	0	0	0	0	0
		Titik batas	6	6	4	4	2	2	0	0
	Y	Titik leleh	3	2	0	0	0	0	0	0
		Titik batas	6	2	6	2	2	2	0	0

Daktilitas Struktur

Faktor daktilitas (μ) diperoleh dari rasio antara simpangan saat kondisi batas dibagi dengan simpangan saat kondisi leleh dari analisis *pushover*. Daktilitas setiap model SRPMK, SRBE, dan SRDS bisa dilihat pada Tabel 14. Faktor daktilitas SRPMK berkisar 4.65-4.81, SRBE berkisar antara 3.06-3.32 dan SRDS berkisar antara 2.67-2.96 untuk arah X dan arah Y.

Tabel 14. Perbandingan daktilitas model struktur

Model	Pushover	Simpangan Leleh (mm)		Simpangan Runtuh (mm)		Daktilitas	
		4LT	10LT	4LT	10LT	4LT	10LT
SRPMK	X	98.65	178.40	458.90	851.42	4.65	4.77
	Y	98.77	180.33	465.16	867.54	4.71	4.81
SRBE	X	126.40	222.05	386.60	722.56	3.06	3.25
	Y	127.01	231.34	396.87	768.53	3.12	3.32
Sistem Dinding Geser	X	86.21	208.94	230.18	593.41	2.67	2.84
	Y	87.15	213.45	237.29	631.35	2.72	2.96

Dari Tabel 14 terlihat bahwa SRPMK memiliki nilai daktilitas lebih besar dari model lain, dimana nilai daktilitas untuk model 4 LT arah X dari SRPMK 4,65 SRBE 3,06; sistem dinding geser 2,67, arah Y: SRPMK 4,71; SRBE 3,12; sistem dinding geser 2,72 dan untuk model 10 LT arah X: SRPMK 4,77; SRBE 3,25; sistem dinding geser 2,84, arah Y: SRPMK 4,81; SRBE 3,32; sistem dinding geser 2,96.

SIMPULAN DAN SARAN

Simpulan

Dari hasil analisis dan pembahasan dapat diambil kesimpulan, adalah:

- a. Sistem dinding geser memiliki gaya geser dasar batas yang paling besar dari model

lain. Dengan nilai gaya geser dasar untuk model 4 LT arah X: sistem dinding geser 11647,63 KN; SRBE 8402,88 KN; SRPMK 4576,70 KN, arah Y: sistem dinding geser 11658,34 KN; SRBE 8414,65 KN; SRPMK 4592,69 KN dan untuk model 10 LT arah X: sistem dinding geser 16793,63 KN; SRBE 11122,53 KN; SRPMK 5157,38 KN, arah Y: sistem dinding geser 16878,93 KN; SRBE 11923,37 KN; SRPMK 5164,23 KN.

- b. Sistem dinding geser memiliki kinerja perpindahan yang paling baik, karena nilai perpindahan dari sistem dinding geser paling kecil dari model lain. Dengan nilai perpindahan untuk model 4 LT arah X: sistem dinding geser 3,46 mm; SRBE 6,47 mm; SRPMK 19,11 mm, arah Y: sistem dinding geser 3,47 mm; SRBE 6,50 mm; SRPMK 19,12 mm dan untuk model 10 LT arah X: sistem dinding geser 25,54 mm; SRBE 44,64 mm; SRPMK 89,49 mm, arah Y: sistem dinding geser 25,55 mm; SRBE 44,68 mm; SRPMK 89,52 mm.
- c. Untuk beban gempa yang sama mengacu pada model SRPMK. Dengan nilai perpindahan untuk model 4 LT arah X: SRPMK 458,90 mm; SRBE 91,17 mm; sistem dinding geser 28,76 mm, arah Y: SRPMK 465,16 mm; SRBE 94,61 mm; sistem dinding geser 32,84 mm dan untuk model 10 LT arah X: SRPMK 851,42 mm; SRBE 235,54 mm; sistem dinding geser 187,56 mm, arah Y: SRPMK 867,54 mm; SRBE 245,56 mm; sistem dinding geser 193,64 mm.
- d. SRPMK memiliki nilai daktilitas lebih besar dari model SRBE dan sistem dinding geser. Dimana nilai daktilitas untuk model 4 LT arah X: SRPMK 4,65; SRBE 3,06; sistem dinding geser 2,67, arah Y: SRPMK 4,71; SRBE 3,12; sistem dinding geser 2,72 dan untuk model 10 LT arah X: SRPMK 4,77; SRBE 3,25; sistem dinding geser 2,84, arah Y: SRPMK 4,81; SRBE 3,32; sistem dinding geser 2,96.

Saran

- 1. Dalam memilih sistem gedung yang berperilaku elastik, sistem dinding geser

sangat ideal, karena memiliki kekuatan dan kekakuan elastik yang sangat tinggi diantara ketiga model. Sementara itu, dalam hal perilaku in-elastik, SRPMK lebih unggul, dengan daktilitas dan penyerapan energi yang paling tinggi.

2. Penelitian ini dapat dikembangkan lagi dengan menghitung volume beton dan baja untuk mendapatkan keekonomisan struktur.

DAFTAR PUSTAKA

- Applied Technology Council, and Department of Homeland Security. 2005. FEMA 440 *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures*. June 2005. California, and Washington, D.C.
- Atimtay, E., 2001, *Design of Reinforced Concrete Systems with Frames and Shear Walls: Fundamental Concepts and Calculation Methods*, Volume 1&2, 2nd Edition, June 2001, Ankara.
- Astarika. 2013. *Analisis Pushover Struktur Rangka Bering V-Terbalik Eksentrik Dengan Panjang Link Bervariasi*. Laporan Penelitian, Universitas Udayana : Bali.
- Fajfar, P. and Krawinkler, H., 1992, *Nonlinear Seismic Analysis and Design of Reinforced Concrete Buildings*, Elsevier Applied Science, New York, USA.
- Hiraishi, H. 1983. *Evaluation of Shear and Flexural Deformations of Flexural Type Shear Walls*, Procs. 4th Joint Tech. Coord. Committee, U.S.-Japan Coop. Earth. Research Program, Building Research Institute, Tsukuba, Japan.
- Mas Utari. 2005. *Perbandingan kinerja Dinding Geser Dengan Beberapa Teknik Pemodelan*. Laporan Penelitian, Universitas Udayana, Bali.
- Muslinang Moestopo, Nidiasari. 2010. Kajian Numerik Perilaku Link Panjang Dengan Pengaku Diagonal Badan Pada Sistem Rangka Baja Berpengaku Eksentris, Seminar dan Pameran HAKI.
- Standar Nasional Indonesia. 2012. *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung SNI 03-1726-2012*, Badan Standarisasi Nasional: Jakarta.
- Tolga. 2004. *Lateral Load Analysis Of Shear Wall-Frame Structures*. A Thesis Submitted To The Graduate School Of Natural And Applied Sciences. The Middle East Technical University.